

Surfaces satinées: Quelques méthodes susceptibles de rendre compte de leur aspect.

Grégoire Meylan, Fabien Bourgeois, Yuri L. de Meneses, Jacques Jacot
 Lab. de Production Microtechnique - Institut de Production Microtechnique-EPFL, 1015 Lausanne
 yuri.lopezdemeneses@epfl.ch, jacques.jacot@epfl.ch

1. Introduction

De nombreux systèmes automatiques de contrôle dimensionnel et de mesure de l'état de surface existent sur le marché, souvent basés sur des systèmes de vision [1] ou sur des tests des propriétés mécaniques de la surface. En revanche, l'aspect décoratif d'une surface est encore contrôlée visuellement par des opérateurs humains, les *visiteuses*, spécialement formées à cette tâche. Malgré leur formation, visant à systématiser et à uniformiser leur jugement, le contrôle reste purement qualitatif, voir subjectif. On constate une variabilité des appréciations entre différents opérateurs et même pour chaque opérateur, en fonction de sa fatigue et de causes psychologiques externes.

Le projet décrit dans cet article vise à terme à développer un appareil d'atelier capable d'effectuer un contrôle objectif et quantitatif de l'aspect d'une surface. Le but recherché n'est pas de connaître la topographie exacte d'une surface satinée, mais de pouvoir distinguer des pièces d'aspects différents et de les classer dans les mêmes catégories que le ferait un opérateur humain. L'originalité de l'approche est de remplir cette tâche sans passer par la connaissance des critères utilisés par les experts humains.

Comme première étape du projet, nous nous sommes limités à classer des surfaces métalliques satinées planes. Le satinage se caractérise physiquement par des stries unidirectionnelles qui donnent un teint uniformément mat à la pièce. Pour l'obtenir, le polisseur appuie légèrement la pièce contre une brosse rotative. Si son mouvement est correct, les raies créées donnent un aspect mat à la surface. Les opérations de préparation de la pièce jouent également un rôle important sur l'aspect final.

Ce projet s'insère dans les activités du groupe Vision du LPM (Laboratoire de Production Microtechnique, EPFL), à savoir le contrôle de qualité par la vision, la classification de données et la modélisation de la perception humaine appliquée aux textures.

Dans la section (§ 2.), nous décrivons la méthodologie suivie pour la classification des données, commune aux quatre méthodes développées. La section (§ 3.) présente les quatre méthodes d'acquisition de données ainsi que les résultats obtenus lors des expériences. Une comparaison des méthodes (§ 4.) suivie d'une discussion (§ 5.) établiront un premier bilan du projet.

2. Méthodologie

Les pièces sont triées dans différentes catégories que nous appelons 'classes'. Les critères utilisés pour caractériser l'aspect des pièces sont appelés *caractéristiques*, (en anglais *features*) que nous grouperons sous la forme d'un vecteur. Classifier revient à trouver une application faisant correspondre pour chaque vecteur de caractéristiques d'une pièce, une classe préalablement définie dans un ensemble Ω de K valeurs. Pour cela, nous supposons que des surfaces similaires *devraient* produire des vecteurs de caractéristiques proches. On peut représenter le processus de classification par le schéma suivant:

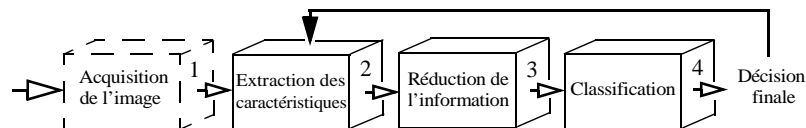


Figure 2.1: Processus de classification.

Il est important de retenir que la classification proprement dite (bloc 4 dans (Fig. 2.1)) travaille à partir de vecteurs dont elle ignore l'origine et la méthode d'obtention. Les méthodes de classification que nous utiliserons sont génériques. C'est l'extraction des caractéristiques qui est propre au problème de l'aspect des surfaces.

2.1 Extraction des caractéristiques par les propriétés de la lumière

Le contrôle doit être non-destructif. Les quatre méthodes optiques différentes enregistrent grâce à une caméra une information de la surface de la pièce à examiner et exploitent certaines propriétés de la lumière (longueur d'onde, intensité, phase, polarisation, modulation) afin d'extraire de chaque pièce un vecteur de caractéristiques $\vec{x} = (x_1, \dots, x_p) \in R^p$ qui la représente. Par exemple, les vecteurs peuvent contenir des mesures d'intensité lumineuse réfléchie par la pièce, ou encore la dimension et la position d'une tache de lumière.

2.2 Réduction des dimensions: PCA

Un seul critère ne permet jamais de classer une surface, il faut prendre en compte l'ensemble du vecteur. Toutefois, avec l'augmentation du nombre de dimensions du vecteur de caractéristiques, il devient de plus en plus difficile d'établir une classification, d'abord parce que la dimension des données augmente, et ensuite parce que la prise en compte d'informations non nécessaires est susceptible d'introduire du bruit.

Pour réduire les dimensions des caractéristiques, nous avons utilisé l'analyse par composantes principales [2] (PCA¹ en anglais). Elle réduit le nombre de composantes d'un ensemble de vecteurs en gardant les composantes dont la combinaison linéaire a la plus grande variance. Nous conservons ainsi le maximum de dispersion avec une perte minimale d'information. Cette méthode offre une solution mathématiquement optimale pour des données orthogonales, et le temps de calcul est très court. La réduction des dimensions permet de "sélectionner" les caractéristiques les plus pertinentes et d'éliminer celles dont la variabilité peut être due au bruit de mesure.

De plus, si nous simplifions l'espace des caractéristiques pour arriver à moins de trois dimensions nous pouvons facilement visualiser les mesures. Si elles forment des amas (clusters en anglais) de pièces de la même classe, il est possible de définir des droites ou courbes de séparation entre les classes.

2.3 Classification

Dans ce projet nous avons aussi employé des classificateurs "à réseaux de neurones" comme le "Self-Organizing Map" (SOM), Learning Vector Quantization (LVQ) et les Support Vector Machines (SVM) [2]. Ces classificateurs, pour lesquels les fondements théoriques et les liens avec la statistique sont bien connus nous ont permis de vérifier la pertinence de la classification. Nous avons successivement enlevé une mesure du lot, entraîné les réseaux de neurones sans cette mesure, puis vérifié si la pièce, enlevée au début, était correctement classifiée (test appelé "drop one out").

3. Méthodes d'acquisition et résultats

Il existe de nombreuses méthodes optiques permettant d'acquérir une information d'une surface satinée. Nous présentons quatre méthodes différentes pour extraire des caractéristiques de l'aspect du satinage.

3.1 Holographie

La première expérience que nous avons menée tentait d'établir quelles caractéristiques du relief de la pièce permettaient de la classer. Pour obtenir une topographie de la pièce, nous avons eu recours à l'holographie digitale, sujet de recherche de nos collègues de l'Institut d'Imagerie et Optique Appliquée (IOA) de l'EPFL que nous remercions pour leur aide dans cette partie du projet.

3.1.1 Principe

L'holographie consiste à interférer deux ondes: une onde de référence et une onde modulée par l'échantillon. La figure d'interférence, appelée hologramme, est une différence de phase [7]. Cette différence de phase est proportionnelle à la différence du chemin optique parcouru, et donc au relief de la

1. Principal Component Analysis

surface de l'objet. Si la différence de chemin parcouru est très grande, il y a des sauts à chaque multiple de 2π . Il faut alors "dérouler" la phase pour reconstituer la topographie de la pièce.

3.1.2 Montage et prétraitement

Nous avons utilisé un montage dont le champ de mesure était de $200\text{ }\mu\text{m} \times 200\text{ }\mu\text{m}$ et la résolution d'environ $1\text{ }\mu\text{m}$. Il est possible d'étendre la technique afin de couvrir une zone d'approximativement $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ [6]. Après le déroulement de la phase on obtient la topographie de la pièce, comme par montré dans la figure 3.1.

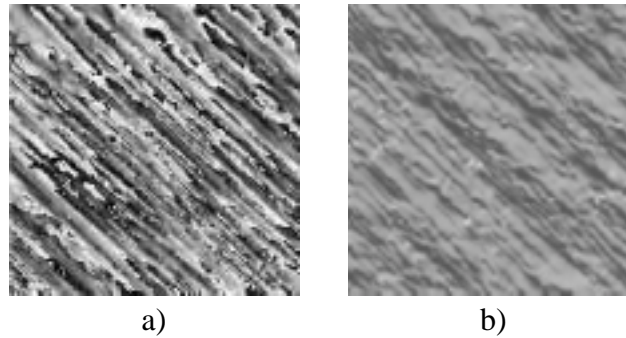


Figure 3.1: a) Phase enroulée; b) Phase déroulée.

3.1.3 Résultats obtenus

Deux types de caractéristiques ont été étudiées. Le premier prélève sur chaque image une série de profils perpendiculairement aux stries du satinage, pour mesurer la profondeur des stries. La deuxième mesure l'unidirectionnalité des raies, mise en évidence par la dispersion des stries du satinage.

Profils de profondeur des stries

A partir des profils prélevés, nous avons recherché si l'information de profondeur était caractéristique pour chaque classe de pièces. Nous avons extrait l'écart-type, la différence entre le minimum et le maximum, ainsi que la moyenne. Chaque image est représentée par un vecteur contenant ces trois informations pour une douzaine de coupes. En appliquant la PCA à ce vecteur de caractéristiques, nous remarquons que la profondeur n'est pas une caractéristique suffisante pour classifier les pièces (Fig. 3.2). Les méthodes classiques, se basant sur des profilomètres optiques ou mécaniques (rugosimètres), ne peuvent donc pas fournir une information suffisante pour classifier des pièces satinées.

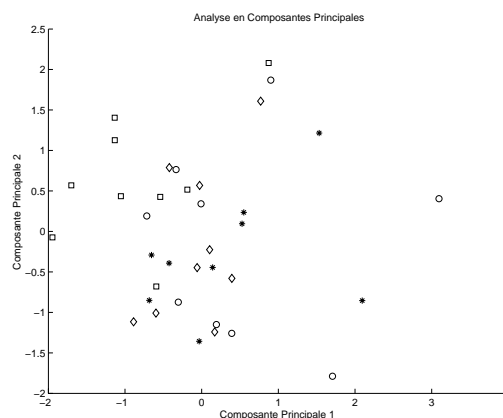


Figure 3.2: PCA pour les caractéristiques de profondeurs: la profondeur des stries ne permet pas de classifier les pièces. (Etoiles = bon satinage; Losange = satinage moyennement bon; Carré = mauvais satinage.)

Dispersion de la direction des raies

L'homogénéité d'orientation des stries sur une pièce est élevée si elle est bien satinée, et faible dans le cas contraire. Nous pouvons faire ressortir la directionnalité des stries pour chaque image en appliquant des filtres. La figure suivante montre l'histogramme du résultat pour deux satinages différents:

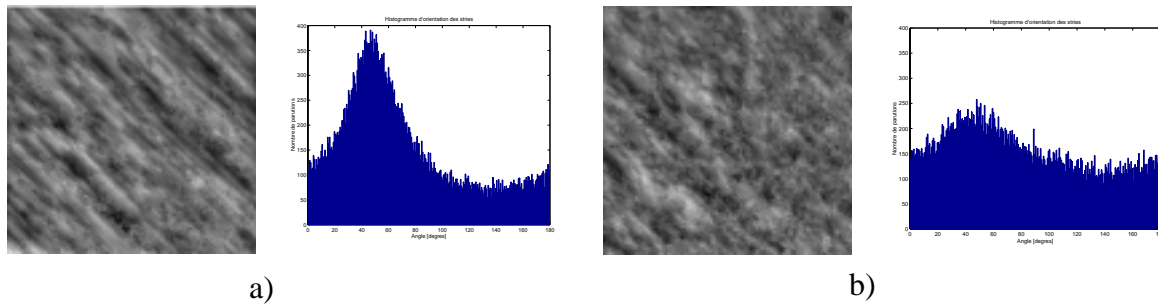


Figure 3.3: Histogrammes de l'information obtenues après avoir appliqué un filtre de Sobel (gradient) aux images a (bonne) et b (mauvaise). La dispersion des fréquences spatiales du satinage est clairement visible dans la figure du bas.

La PCA d'un vecteur, contenant l'écart-type, le maximum ainsi que la valeur moyenne de cet histogramme, permet de distinguer très clairement les bonnes des mauvaises pièces, à quelques exceptions près.

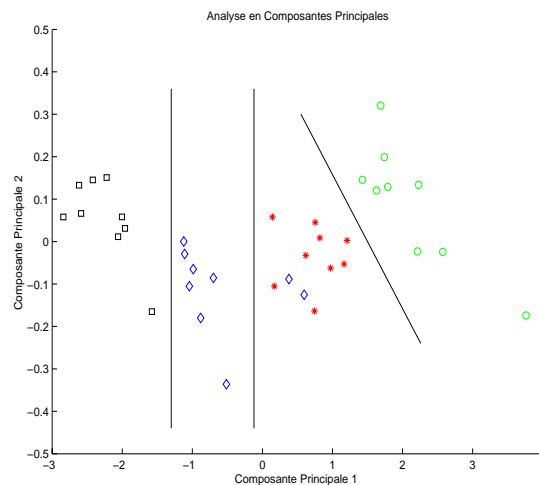


Figure 3.4: PCA pour les caractéristiques d'orientation: la classification est réalisable à partir des caractéristiques d'orientation. (Etoiles = bon satinage; Losange = satinage moyennement bon; Carré = mauvais satinage.)

3.2 Lumière polarisée

3.2.1 Principe et montage

La polarisation d'une onde lumineuse nous renseigne sur la répartition de l'orientation des vibrations qui composent cette onde. La réflexion de la lumière sur une surface métallique provoque une modification de la polarisation. Nous avons utilisé ce phénomène, à la base des ellipsomètres employés pour l'analyse des couches fines, afin de classer des pièces satinées [9][10].

Le montage réalisé a la configuration suivante (Fig. 3.5). La source de lumière est un laser Hélium-Néon ($\lambda = 632.8$ nm) à faible puissance (5 mW). L'angle d'incidence du faisceau sur la surface satinée est compris entre 60° et 70° , les stries sont présentées perpendiculairement. Un polariseur tournant permet de modifier la polarisation de la lumière diffusée. Une caméra CCD enregistre la projection de ce

faisceau sur un écran. Un filtre a été placé juste devant la caméra afin de sélectionner la bonne longueur d'onde et ainsi de réduire l'influence de la lumière ambiante.

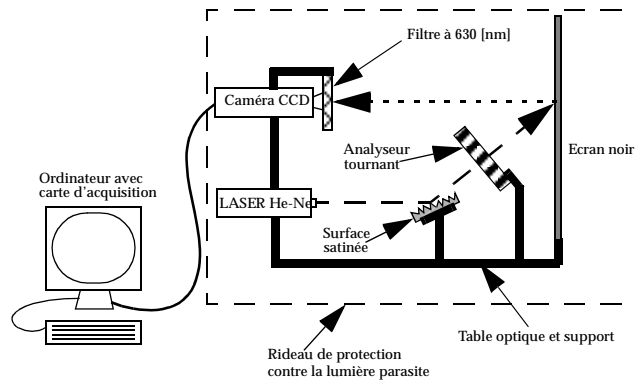


Figure 3.5: Montage utilisé pour l'analyse de la polarisation.

Nous avons analysé 4 pièces satinées: 2 bonnes pièces relativement identiques entre elles et 2 pièces ayant un satinage non conforme pour des raisons différentes.

3.2.2 Résultats obtenus

L'image suivante montre la figure de diffusion enregistrée sur ce montage (Fig. 3.6):

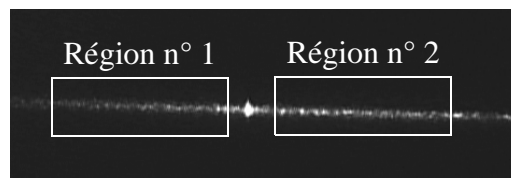


Figure 3.6: Régions analysées pour une orientation des lignes du satinage perpendiculaire au plan d'incidence du faisceau lumineux.

Les deux régions illustrées (Fig. 3.6) délimitent la diffusion du faisceau due aux stries du satinage. Une surface parfaitement plane ne produirait que la tache spéculaire visible au centre de l'image. Pour chacune de ces régions, nous avons additionné l'intensité de chaque pixel, et ceci selon trois polarisations sélectionnées: a) polarisation perpendiculaire au plan d'incidence, b) polarisation à 45°, c) polarisation parallèle. Nous obtenons ainsi des vecteurs à 6 dimensions que la PCA réduit par la suite à 2 (Fig. 3.7).

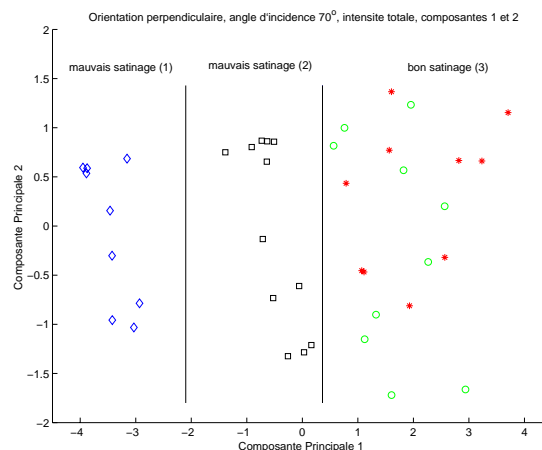


Figure 3.7: PCA: la classification est réalisable et crée des classes distinctes. (Losanges = mauvais satinage n° 1; Carrés = mauvais satinage n° 2; Etoiles et ronds = bons satinages.)

Cette méthode permet de regrouper les pièces de même aspect visuel en une seule classe. La première composante principale est suffisante pour séparer ces classes. Cette classification est très robuste, car la dispersion des caractéristiques peut augmenter d'un facteur 4 avant de commettre une erreur de classification [9].

3.3 Diffusion (Scattering)

3.3.1 Principe et montage

Lorsqu'une onde est réfléchiée sur une surface rugueuse, une figure de diffusion apparaît. Cette diffusion va varier non seulement suivant la topographie de la surface, mais également suivant la longueur d'onde, la direction et l'angle d'incidence du faisceau. Le satinage se caractérise par une structure périodique selon une direction préférentielle. Une telle topographie donnera un motif de diffusion perpendiculaire à cette direction préférentielle, distribué sur une ligne si l'incidence du faisceau est perpendiculaire aux stries et sur une courbe si l'incidence est parallèle [11][4].

Le montage est semblable à celui utilisé pour la lumière polarisée (§ 3.1.2), si ce n'est l'abandon du polariseur et l'orientation de la pièce, (éclairage longitudinal) (Fig. 3.8).

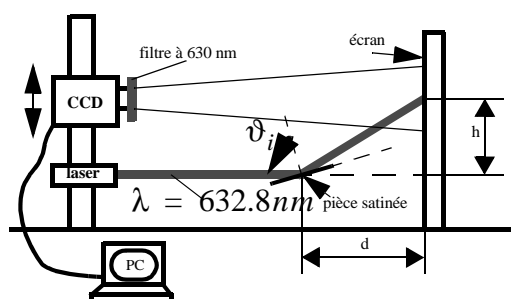


Figure 3.8: Montage utilisé pour l'analyse de la diffusion.

3.3.2 Résultats obtenus

Pour éviter des phénomènes d'ombrage, nous avons choisi d'orienter le faisceau parallèlement aux stries du satinage. Les figures de diffusion sont courbes (Fig. 3.9).

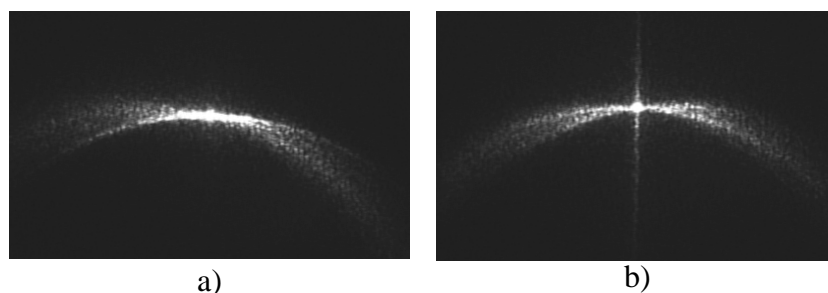


Figure 3.9: Profils de diffusion pour une incidence parallèle. a) bonne pièce; b) mauvaise pièce (le trait vertical est dû à des raies perpendiculaires aux stries du satinage).

Nous avons choisi 5 paramètres pour caractériser chaque image. Le vecteur des caractéristiques est composé de: 1) la moyenne du profil de diffusion le long de la courbe; 2) la moyenne du profil de diffusion du trait vertical; 3) la taille de la tâche de lumière diffusée; 4) la taille de la tâche de lumière spéculaire; 5) la dispersion de l'intensité dans la direction normale à la courbe. A l'aide de la PCA, nous pouvons réduire la dimension de l'espace des caractéristiques de \mathfrak{R}^5 à \mathfrak{R}^2 . Nous obtenons le graphique a) de la figure suivante (Fig. 3.10).

Les différentes pièces forment des amas de points conformes à leur aspect. Les frontières de séparations ne sont cependant pas très nettes. Si nous restreignons le problème à distinguer les bonnes pièces des mauvaises, sans distinction à l'intérieur de ces deux groupes, nous pouvons n'utiliser que deux

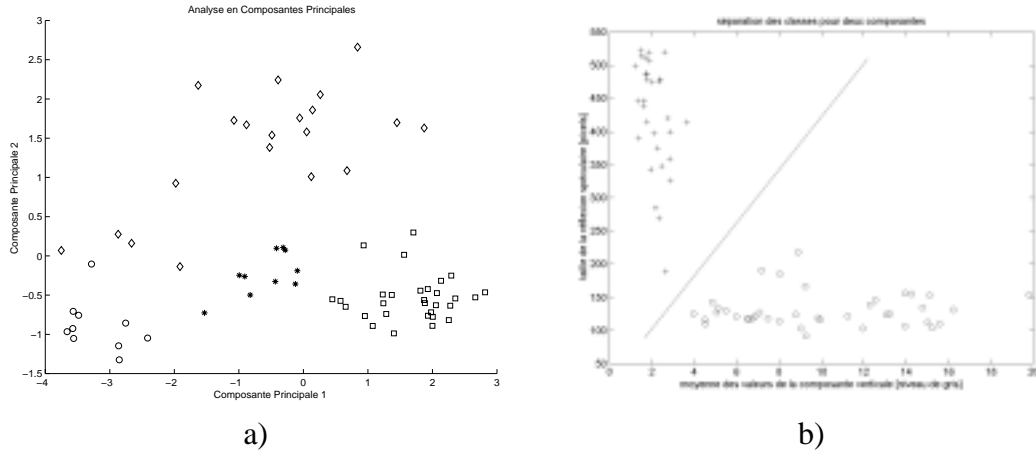


Figure 3.10: a) PCA: Classification possible entre les pièces satinées. (Etoiles, ronds et losanges = mauvais satinages; Carrés = bons satinages.); b) PCA, représentation suivant 2 caractéristiques: les bonnes pièces sont clairement séparables des mauvaises. (Ronds = bons satinages; Etoiles = mauvais satinages.)

caractéristiques: 1) la moyenne du profil de diffusion du trait vertical; 2) la taille de la tache de lumière spéculaire. Comme les vecteurs sont bidimensionnels, ils sont facilement représentables dans un espace plan, (Fig. 3.10) graphique b). La séparation est très nette.

3.4 Transformée de Fourier optique (TFO)

3.4.1 Principe et montage

La transformée de Fourier optique donne le spectre des fréquences spatiales d'un objet éclairé par une lumière monochromatique, en déplaçant le détecteur au plan focal d'une lentille [5][12]. Le montage optique réalisé se base sur une configuration dite "à distance finie" [5]:

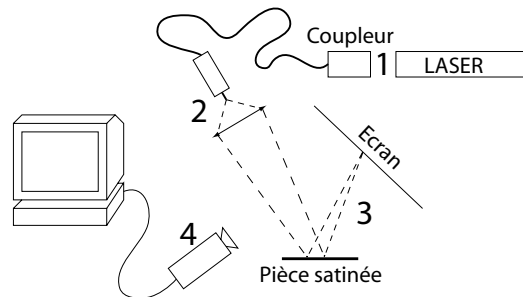


Figure 3.11: Montage. 1) Laser et coupleur; 2) Lentille de focalisation; 3) Support de la pièce et écran; 4) Caméra.

En couplant le faisceau laser (He-Ne 632.8 nm) dans une fibre optique monomode on obtient une source très ponctuelle, ce qui crée une onde quasi parfaite qui est convergée par la lentille de focalisation. Selon le positionnement de la pièce, la taille du spot d'illumination varie. Nous avons effectué nos mesures avec une taille de spot elliptique de 16 x 8 mm. Le résultat de la transformée de Fourier a été observé sur un écran blanc et enregistré par une caméra CCD.

3.4.2 Résultats obtenus

La figure (Fig. 3.12) montre une image obtenue sur le montage optique. La figure centrale représente en réalité le module au carré de la transformée de Fourier de la topographie du satinage. Pour chaque image, on prélève un profil d'intensité horizontal sur la ligne qui contient le pixel d'intensité maximale et on le met dans un vecteur de caractéristiques.

En soumettant ces vecteurs à la PCA, nous obtenons une visualisation bidimensionnelle de nos données (Fig. 3.13).

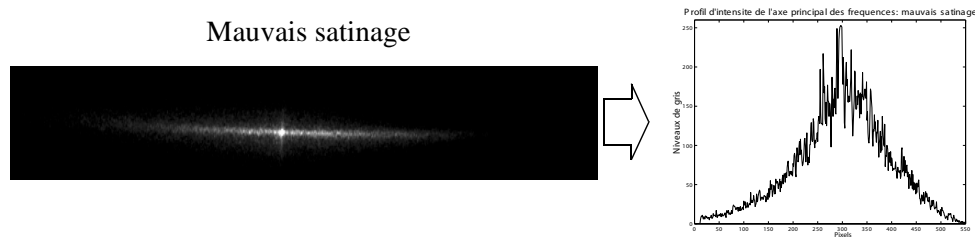


Figure 3.12: Extraction des caractéristiques de la TFO.

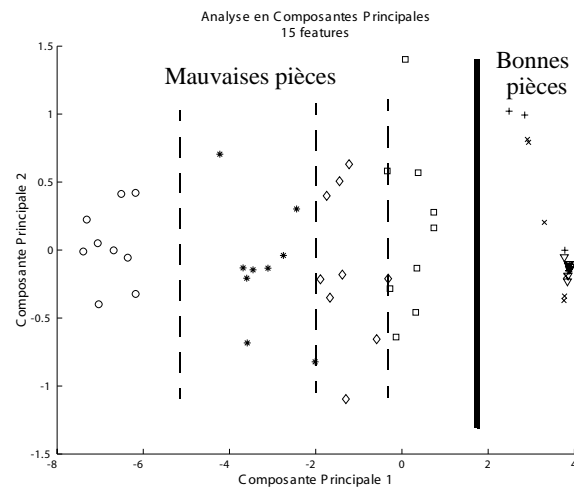


Figure 3.13: PCA: Classification réalisable avec une nette séparation entre les bonnes pièces et les mauvaises ainsi qu'une séparation parmi les mauvaises.

Les bonnes pièces sont séparées des mauvaises et sont en plus toutes regroupées ensemble. Pour les mauvaises pièces, une distinction existe suivant le type de défaut rencontré. Une classification par réseau de neurones (SOM, LVQ, SVM) a permis de classer les différentes pièces avec un taux d'erreur nul par un test “drop one out”.

4. Comparaison des outils d'acquisition

Offrant des résultats relativement semblables, les quatre méthodes exploitées présentent des caractéristiques techniques de mise en oeuvre différentes. Le tableau (Tableau 4.1) compare les quatre méthodes.

Tableau 4.1: Comparaison des outils d'acquisition

Critères	Holographie	Lumière polarisée	Scattering	TFO
Potentiel de robustesse	Grand nombre de paramètres de réglage.	<ul style="list-style-type: none"> • Bon rapport signal sur bruit. • Montage simple, peu de paramètres réglés 	Montage simple, peu de paramètres à régler.	<ul style="list-style-type: none"> • Test “drop one out”: 100% de réussite. • Insensible aux paramètres du système.
Temps de traitement	<ul style="list-style-type: none"> • Acquisition: 25Hz Reconstruction interférence: < 0.5 s. • Déroulement phase et traitements: 10 s. 	<ul style="list-style-type: none"> • 3 acquisitions nécessaires: min 8.3 Hz. • Changement du polariseur. 	Traitement: 25 Hz.	<ul style="list-style-type: none"> • TFO est instantanée. Evite 0.5s de FFT software. • Traitement: 25 Hz.
Type	Laboratoire: étalon	Ligne de production	Ligne de production.	Ligne de production.
Aire examen	200 μm x 200 μm .	Environ 10 mm^2 .	Environ 10 mm^2 .	16 x 8 mm^2 , réglable

Pour une application portable utilisable dans un atelier de production, il est important de prendre en compte les caractéristiques de chaque méthode.

5. Conclusions

Sans connaître les critères sur lesquels se base un opérateur humain pour qualifier une pièce métallique satinée plane, nous avons pu identifier des caractéristiques pertinentes pour reproduire un jugement identique. Les méthodes explorées permettent de classifier les différents aspects d'état de surface dans les mêmes classes que le ferait un expert.

Une bonne discrimination est atteinte entre les bons satinages et ceux comportant des défauts d'apparence - double satinage, déformation au dégrossissage, défauts de matière, etc - ainsi qu'entre les différents types de défauts. Au sein des bonnes pièces, nous ne pouvons pas créer des sous-groupes. Ainsi, nos méthodes ne font pas une classification différente de chaque pièce, mais elles regroupent les mêmes types d'aspect de surface. Pour maîtriser la qualité de production, il faut établir une boucle de contrôle permettant de remonter à l'origine du défaut. Nos résultats sont encourageants: ils permettent de déceler le type de défaut d'une mauvaise pièce et nous font penser qu'il est possible de remonter à l'origine de ce défaut, mais cela nécessitera encore d'importants travaux d'analyse.

Par rapport aux méthodes connues actuellement en production, les méthodes que nous proposons offrent l'avantage principal de l'objectivité du contrôle. Elles permettent d'envisager d'établir une échelle de référence des satinages sans nécessiter l'identification des facteurs d'observation.

Dans le cas du scattering et de la lumière polarisée, le traitement de l'information est simple et extrêmement rapide (fréquence vidéo).

Pour envisager dans un proche avenir la réalisation d'un appareil utilisable en atelier, il faut analyser des surfaces d'objet non planes, évaluer le nombre de point de mesure nécessaire pour caractériser une surface, et définir comment obtenir un balayage efficace de la surface dans un temps acceptable. Nous sommes encore loin de l'appareil portable qui donnera un résultat objectif de l'apparence d'une surface satinée, mais ces travaux ont prouvé que le chemin dans lequel nous nous sommes engagés est praticable. Dans ce sens nous avons soumis à l'Association Suisse de Recherches Horlogères une proposition de projet et une demande de financement pour poursuivre les recherches dans cette direction.

6. Références

- [1] C. Demant, B. Streicher-Abel and P. Waszkewitz, *Industrial Image Processing. Visual Quality Control in Manufacturing*, Springer, 1999.
- [2] S. Haykin, *Neural Networks, a comprehensive foundation*, New Jersey: Prentice Hall International, Inc., 1999, pp. 392-442.
- [3] D. Malacara, *Optical shop testing*, New York : John Wiley & Sons, 1992.
- [4] J.M. Bennett, L. Mattsson, *Introduction to surface roughness and scattering*, Washington D.C. : Optical Society of America, 1989.
- [5] G. Meylan, *Classification de surfaces métalliques satinées par l'analyse de la transformée de Fourier optique*, Lausanne: EPFL-STI-IPR-LPM, 2002.
- [6] T. Kramer, *Analyse des surfaces satinées par holographie*, Lausanne: EPFL-STI-IPR-LPM, 2002.
- [7] E. Cuhe, *Numerical reconstruction of digital holograms*, Thèse n° 2182, EPFL 2000.
- [8] S. Huard, *Polarisation de la lumière*, Paris: Masson, 1993.
- [9] C. Rüttimann, *Classification de l'état de satinage à l'aide de la lumière polarisée*, Lausanne: EPFL-STI-IPR-LPM, 2002.
- [10] W. G. Egan, "Polarization and surface roughness", *Scattering and Surface Roughness II*, San Diego: SPIE-The International Society for Optical Engineering, pp. 144-152, 1998.
- [11] F. Monay, *Analyse d'état de surface de pièces métalliques par scattering*, Lausanne: EPFL-STI-IPR-LPM, 2002.
- [12] J. W. Goodman, *Introduction to -Fourier Optics, 2nd ed.*, New York: McGraw-Hill, 1996.